

УДК 523.982.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛНОГО 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НЕСКОЛЬКИМИ ВАРИАНТАМИ АВТОРЕГРЕССИИ И МЕТОДОМ ПРЕДВЕСТНИКА

© 2011 г. В.А. Ожередов¹, Т.К. Бреус¹, В.Н. Обридко²

¹ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк, Московская обл., Россия

Как следует из решения Третьей официальной комиссии по предсказанию циклов солнечной активности, созданной Национальной администрацией США по аэронавтике и космическим исследованиям (NASA), Национальной администрацией США по исследованию океана и атмосферы США (NOAA) и Международной службой охраны окружающей среды (ISES), основанного на результатах анализа многочисленных прогнозов 24-го цикла солнечной активности, пока нет единого мнения о значении амплитуды и времени наступления максимума. Приводятся два различных варианта – 90 единиц и август 2012 г. или 140 единиц и октябрь 2011 г.

Цель настоящей работы – пересмотр прогнозов 24-го цикла на основе сравнительного анализа данных, полученных тремя различными методами: сингулярного спектрального, нелинейного с использованием нейронной сети, предвестника. В качестве предвестника использована динамика солнечных магнитных полей, формирующих солнечные пятна, индексом которых являются числа Вольфа R_z .

Установлено, что согласно прогнозу, основанному на нейросетевом подходе, ожидается значение максимума 24-го цикла, равное 70. Прогноз, сделанный с помощью метода предвестника, дал значение амплитуды 50 и время наступления максимума в апреле 2012 г. С учетом того, что прогноз методом предвестника делался по данным, усредненным за 4.4 года, амплитуда максимума может быть на 20–30 % больше, т.е. порядка 60–70, что близко к значениям, предсказанным нейросетевым методом. Затянувшийся минимум 23-го цикла и предсказанные низкие значения максимума 24-го цикла напоминают сценарий поведения солнечной активности в историческом Дальтоновском минимуме.

Ключевые слова: числа Вольфа, прогноз 24-го цикла, авторегрессионные методы, нейросетевой подход, метод предвестника.

1. Введение

1.1. Обзор подходов к прогнозированию солнечных циклов

Прогноз солнечной активности на несколько лет вперед, а также прогноз характеристик следующего цикла – одни из самых старых задач физики Солнца. Однако нельзя сказать, что за последние годы они успешно решены.

В целом методы прогноза цикла можно условно разделить на два типа. Первый тип прогнозов – методы статистической экстраполяции, или авторегрессионные, когда в анализе участвует один временной ряд, который, собственно, и прогнозируется. Горизонт прогнозирования Rz -индекса авторегрессионными методами обычно составляет несколько месяцев или лет.

Большинство исследователей, занимавшихся прогнозом солнечной активности, основывались на применении этих методов. К подобным работам относится значительная часть существующих прогнозов, начиная от классических работ (см., например, [McNish, Lincoln, 1949; Obridko, 1996]) и до настоящего времени (см. [Kane, 2001, 2002; Loskutov et al., 2001]), в том числе и работы, использующие нейронные сети (см. [McPherson et al., 1995; Fessant, Lantos, 1996]).

Во втором типе прогнозов, называемом методом предвестника, используются дополнительно еще один или несколько временных рядов, например сторонние гелиогеофизические данные (см. [Ohl A.I., Ohl G.I., 1979; Feynman, 1982; Thompson, 1993; Hathaway et al., 1999; Lantos, Richard, 1998]). В отдельных случаях методы предвестников улучшают прогноз, так как позволяют вести прогнозирование, опираясь на некое подобие физической модели.

1.2. Состояние проблемы предсказания 24-го цикла

Для 24-го цикла солнечной активности отмечается существенный разброс в предсказанных величинах максимума. Согласно решению Третьей официальной комиссии по предсказанию циклов солнечной активности, созданной Национальной аэрокосмической администрацией США (НАСА) и Национальной администрацией по исследованию океана и атмосферы США (НОАА), а также Международной службой охраны окружающей среды (ISES), основанном на анализе многочисленных прогнозов 24-го цикла различными методами, возможны два варианта развития событий: максимум цикла будет равен 90 и наступит в августе 2012 г. или он будет равен 140 и наступит в октябре 2011 г. ([Макаров, Тлатов, 2000; Schatten, 2002, 2003; Wang et al., 2002; Duhau, 2003; Meyer, 2003; Svalgard et al., 2005; Douglas Biesecker, 2008; и др.).

Из приведенных сведений становится очевидным, что предсказание 24-го цикла солнечной активности все еще актуально. В последнее время появился ряд публикаций, анализирующих и критикующих использованные ранее методы [Petrovay, 2010], а также обсуждающих обстановку в межпланетном пространстве и в поведении характеристик околоземного пространства, свидетельствующих о чрезвычайно низких значениях всех параметров на нисходящей ветви 23-го цикла и предполагающих развитие сценария вариаций солнечной активности в следующих циклах по типу исторического далтоновского минимума [Russell et al., 2010].

В данной работе предприняты попытки прогноза 24-го цикла различными методами, что позволяет сопоставить их достоинства и ограничения и выбрать оптимальный вариант прогноза.

2. Различные подходы к предсказанию 24-го цикла солнечной активности, использованные в данной работе

2.1. Линейные и сингулярные спектральные предсказания

В настоящей работе использовался ряд ежесуточных данных о вариациях Rz в циклах 21, 22 и 23 солнечной активности (06.01.1977 г. – 30.11.2010 г.), полученных с сайта www.noaa.gov. Применяемые нами авторегрессионные методы имеют дело с одним временным рядом Rz , продолжение которого и будет предсказываться. Для этого исходный ряд условно разбивается на реализации (рис. 1, *a*), состоящие из предикторов,

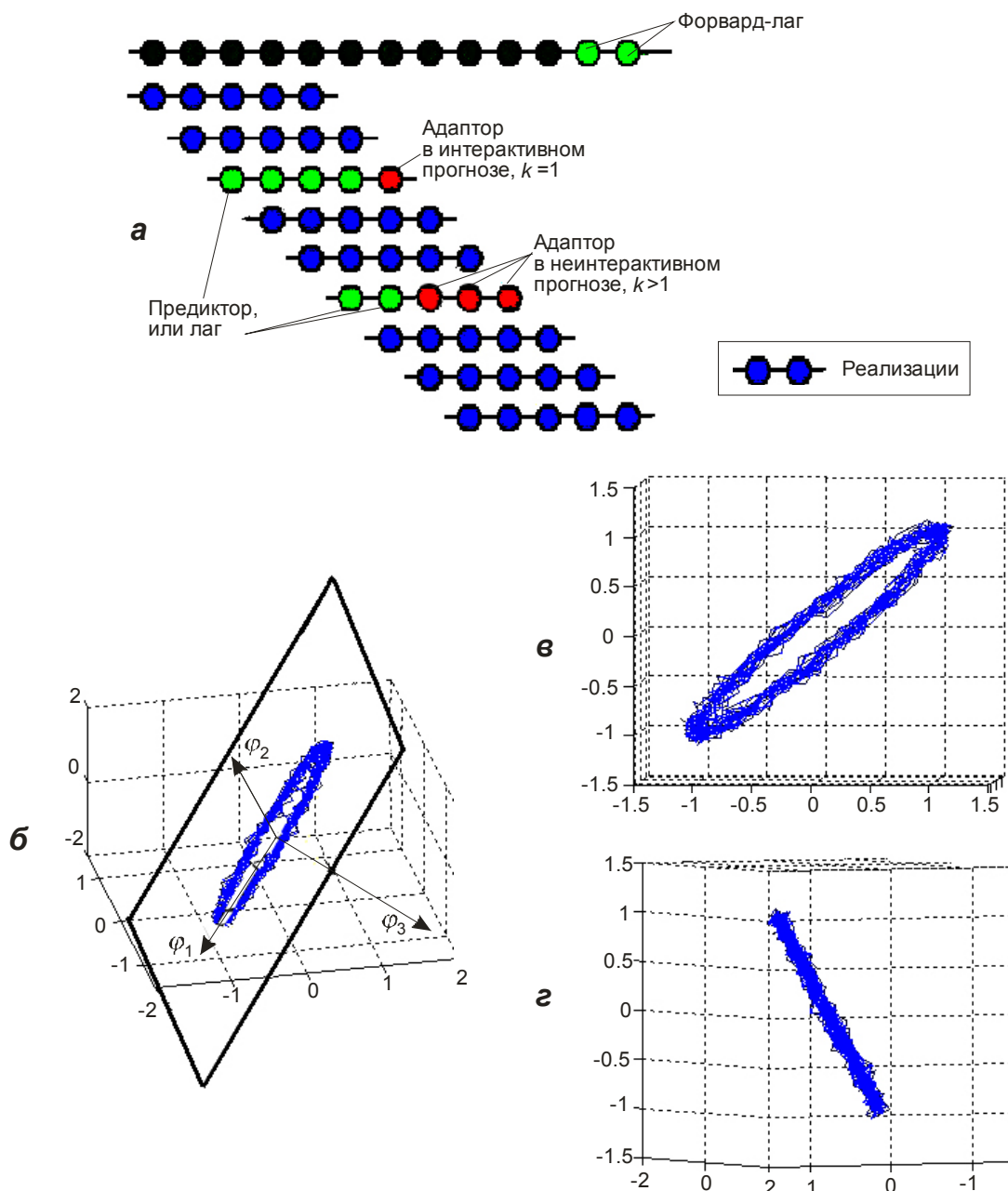


Рис. 1. Схематическое представление формирования прогнозов: *a* – разделение исходного временного ряда на реализации; *б* – поведение вектора реализации в пространстве в случае размерности вектора реализации, равной трем. Остальные пояснения даны в тексте

формирующих лаги (т.е. тех отсчетов, от которых, как предполагается, зависят последующие отсчеты ряда), и адапторов (т.е. тех последующих отсчетов, которые будут предсказываться в процессе обучения алгоритма). Далее алгоритм обучается предсказанию этих известных адапторов, т.е. выявляет зависимость адапторов от предикторов, используя некоторую часть ряда (обучающую последовательность отсчетов). Алгоритм выявляет зависимость между значениями k конечных отсчетов реализаций (рис. 1,а) и предикторами на интервале обучения W (выделяющего эти предикторы и адапторы) для исследуемого временного ряда. Зависимость каждого из k конечных отсчетов реализации и лагом предполагается линейной. Геометрически она представляет собой Q -мерную гиперплоскость. На рис. 1,б,в,г для примера показана двухмерная гиперплоскость. В случае *итеративного прогноза* $k = 1$, т.е. прогноз распространяется на один отсчет данного ряда. В случае *неитеративного прогноза* $k > 1$, т.е. в этом случае в качестве адаптора выступает вектор, и предсказание осуществляется на несколько отсчетов ряда вперед (рис. 1,а). Набор предикторов, после которых следуют предсказываемые отсчеты, называется форвард-лагом. Поиск гиперплоскости осуществляется методом сингулярного спектрального анализа (Singular Spectral Analysis – SSA).

Сингулярный спектральный анализ позволяет предсказывать спектральные компоненты временного ряда, наименее подверженные влиянию шума.

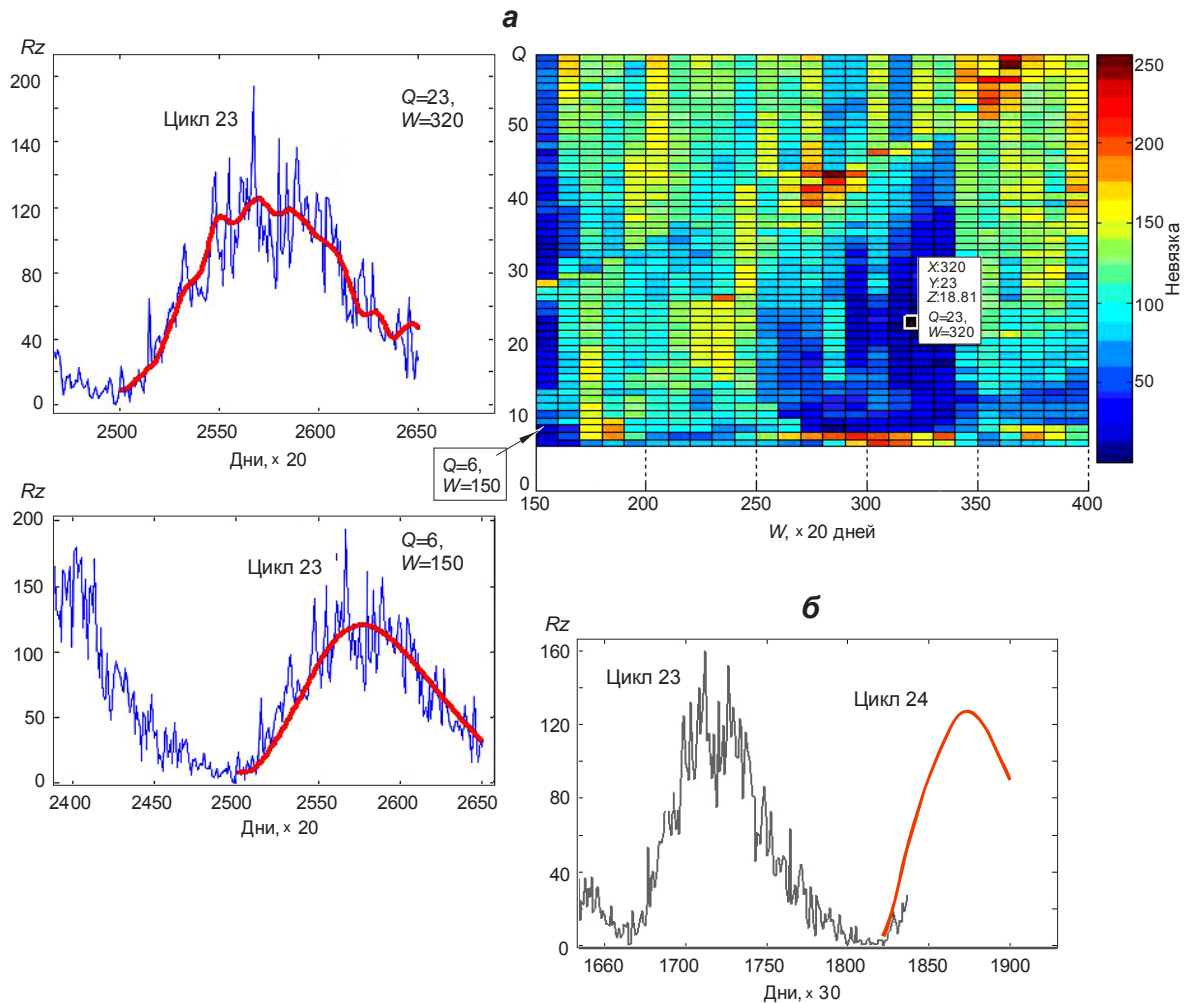


Рис. 2. Примеры прогноза (красная кривая) 23-го (а) и 24-го циклов (б) методом итеративного предсказания. Время выражено в 20- и 30-дневных интервалах

Обычный спектральный прогноз, в отличие от авторегрессионного линейного прогнозирования, характеризуется тем, что в рамках этой методики прогнозируются только отдельные спектральные компоненты временного ряда. При этом спектральный базис обычно задается априорно (см., например, [McNish, Lincoln, 1949; Kane, 2001, 2002] и др.). При сингулярном спектральном прогнозе оптимизируется базис с целью выделения подпространства, минимально пораженного шумом. Каждая реализация из временного ряда проецируется на этот специальный базис, в котором выбирается подпространство направлений, где дисперсии максимальны. Предполагается, что дисперсия шума одинакова для всех направлений, в то время как направления с максимальной дисперсией (т.е. часть спектральных компонент ряда) будут обладать наибольшим отношением сигнал/шум [Пытьев, 1990; Ozheredov et al., 2009]. За счет этого обычно прогноз получается гладким, поскольку не содержит недостоверных вариаций.

На рис. 2,а (справа) показана зависимость невязки (см. шкалу) от размерности гиперплоскости Q и размера интервала обучения W . Невязка представляет собой сумму квадратов разностей предсказанных и реальных значений ряда, и она достигает минимума (глубокий синий цвет) в случае удачного прогноза. Как видно на рис. 2, таких областей несколько. Вследствие этого при, казалось бы, удачных прогнозах отдельных циклов солнечной активности (рис. 2,а,б) в каждом случае можно подобрать пары подходящих значений Q и W . Однако не удастся осуществить прогноз, воспользовавшись одинаковыми значениями этих параметров для всего ряда исследуемых циклов (рис. 2, 3), что означает отсутствие общей закономерности для формирования всего ряда циклов и делает неопределенным прогноз 24-го цикла этим методом.

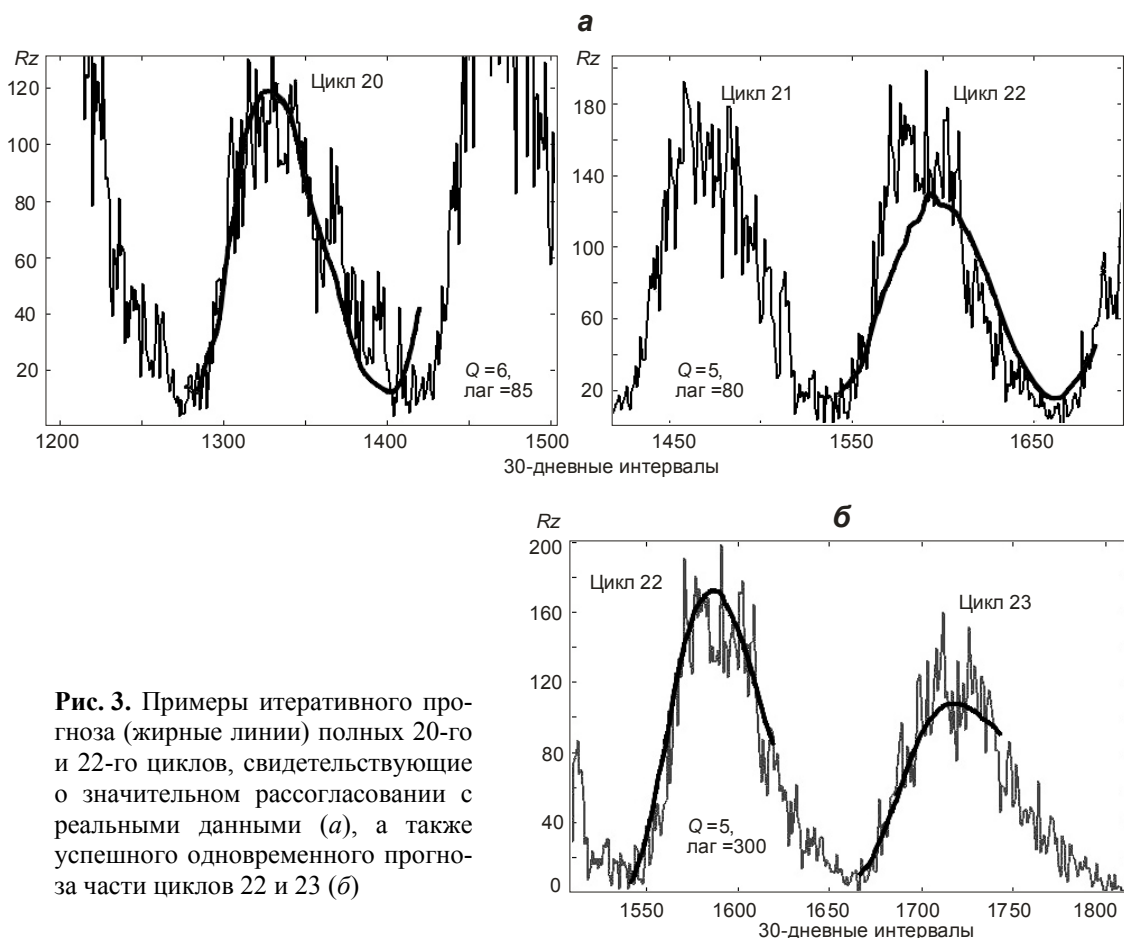


Рис. 3. Примеры итеративного прогноза (жирные линии) полных 20-го и 22-го циклов, свидетельствующие о значительном рассогласовании с реальными данными (а), а также успешного одновременного прогноза части циклов 22 и 23 (б)

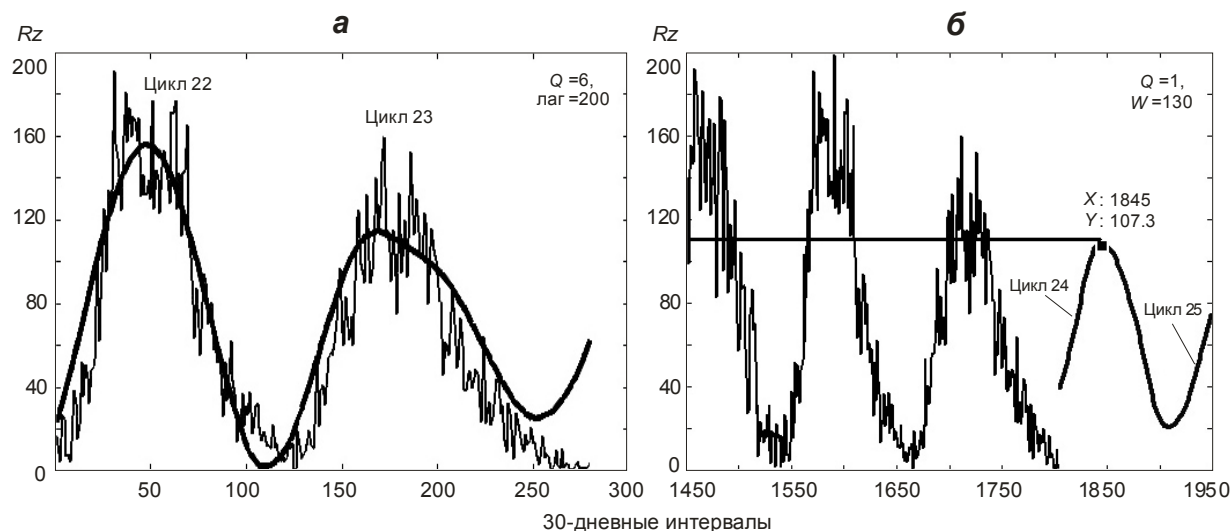


Рис. 4. Примеры неитеративного прогноза 22-го, 23-го и 24-го циклов. Пояснения см. в тексте

Итеративный прогноз (см. рис. 2, 3) имеет особенность накапливать значительную погрешность с увеличением горизонта прогноза, он в основном подходит для краткосрочных прогнозов (рис. 3,б).

Неитеративный прогноз позволяет делать предсказание долговременных вариаций временных рядов, например, на протяжении двух циклов (22-го и 23-го), как показано на рис. 4,а. Однако такой прогноз не обладает достаточной адаптивностью. Это приводит к рассогласованию предсказанных и реальных вариаций чисел Вольфа R_z (см. подъем предсказанной ветви R_z в конце 23-го цикла, рис. 4,а) и рассогласованию между циклами 23 и 24 на рис. 4,б при прогнозе 24-го и части 25-го циклов.

2.2. Итеративный нелинейный прогноз 24-го цикла с использованием нейросетевого подхода

При итеративном прогнозе с использованием нейросетевого подхода (в многомерном пространстве лаг-векторов) в случае, когда зависимость адапторов от предикторов в принципе нелинейная, можно предположить, что в некоторой окрестности форвард-лага (см. рис. 1,а) зависимость линейная. Основная проблема – поиск этой окрестности, или, что эквивалентно, прецедентов из нее – ближайших соседей к этому форвард-лагу. Поиск ближайших соседей в нашем случае в 75-мерном пространстве лаг-векторов велся с помощью специально разработанной нейронной сети NATRE (Neurons with Adaptive Turn of Restricting Ellipsoid), когда ближайшие соседи определяются в соответствии с оптимальным расстоянием Махаланобиса¹) [*Mahalanobis*, 1936].

Как можно видеть на рис. 5,а, этот прогноз, сделанный по всем исходным циклам, включая 22-й цикл, дает достаточно удовлетворительное предсказание 23-го цикла солнечной активности с затянувшейся нисходящей ветвью. Хорошее соответствие исходного и предсказанного в 23-м цикле позволяет надеяться, что прогноз 24-го цикла,

¹ Расстояние Махаланобиса – мера расстояния между векторами случайных величин, обобщающая понятие евклидова расстояния. Предложено индийским статистиком П.Ч. Махаланобисом в 1936 г. С помощью расстояния Махаланобиса можно определять сходство неизвестной и известной выборки. Оно отличается от евклидова расстояния тем, что учитывает корреляции между переменными и инвариантно к масштабу.

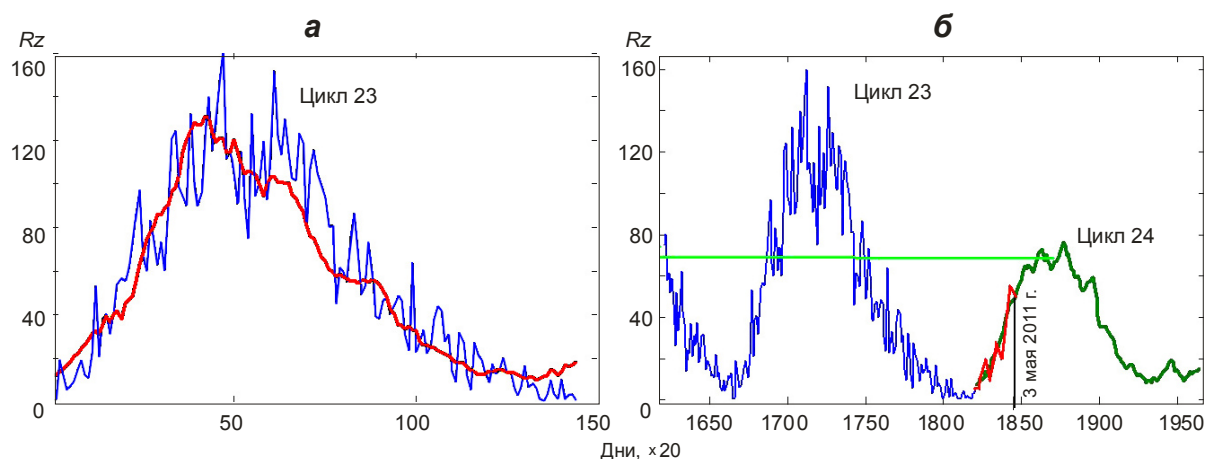


Рис. 5. Итеративный прогноз 23-го и 24-го циклов с помощью нейросетевого подхода. Синие кривые на *a* и *б* – реальные значения Rz для 23-го цикла; красные кривые на *a* и *б* – прогноз 23-го цикла (*a*) и реальные отсчеты Rz начальной фазы 24-го цикла (*б*); зеленая кривая на *б* – прогноз 24-го цикла

сделанный также по всему исходному ряду циклов, включая 23-й цикл (т.е. весь обучающий временной ряд) с той же длиной лага (рис. 5,б), надежен. Он дает хорошее соответствие между предсказанными и реальными значениями чисел Вольфа Rz вплоть до мая 2011 г. и предсказывает для 24-го цикла высоту максимума, равную 70 (рис. 5,б).

В соответствии с предшествовавшими работами, в которых использовались принципиально другие нейронные сети [McPherson et al., 1995; Fessant, Lantos, 1996], амплитуда максимума 24-го цикла оказалась порядка 145. Возможно, расхождение с нашим результатом связано с тем, что в указанных работах не мог быть учтен 23-й цикл и брались данные до начала 23-го цикла. В таком случае для успешного прогноза 24-го цикла в этих работах необходимо было обеспечить горизонт прогноза в два цикла (более 20 лет), что трудно реализовать при итеративном прогнозе, как было показано выше.

3. Метод предвестника

3.1. Выбор предвестника

Далее в работе была предпринята попытка расширения горизонта прогноза чисел Вольфа Rz путем использования метода предвестника, т.е. независимого временного ряда, с опережением коррелирующего с исходным рядом.

В качестве предвестника для построения прогноза 24-го цикла использовались представления о динамике солнечных магнитных полей, формирующих солнечные пятна, т.е. базисные данные для оценки реальных вариаций чисел Вольфа Rz .

На первом этапе, согласно механизму генерации солнечных магнитных полей, предложенному Паркером (альфа – омега – динамо), из полоидального магнитного поля из-за вращения Солнца генерируется тороидальное поле (так называемый, омега-эффект). Индексом тороидального поля Солнца является экваториальное магнитное поле ef . Rz -индекс отражает вариации этого поля. Индексом полоидального поля является полярное поле pf . Этот процесс определяет генерацию солнечного цикла и характеризует его восходящую ветвь протяженностью 4–5 лет.

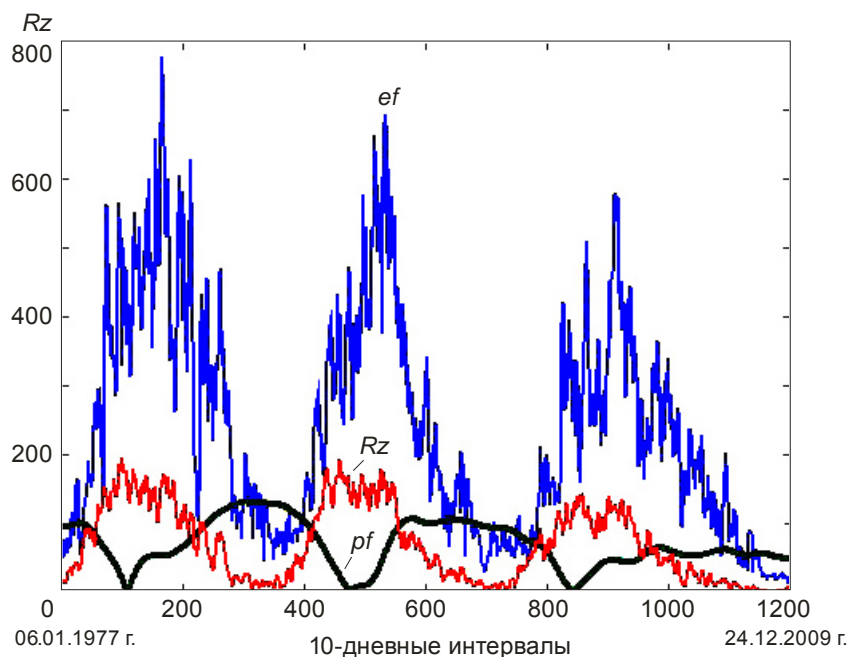


Рис. 6. Исходные данные по Rz , ef , модулю pf , взятые с интервалом 10 дней

На второй стадии полоидальное поле восстанавливается за счет скручивания и вытягивания тороидального поля (альфа-эффект). Эта часть динамики полей соответствует нисходящей части цикла солнечной активности, оставаясь дискуссионной.

В нашем случае к ряду Rz в качестве предиктора (проще говоря, независимой переменной) был добавлен временной ряд квадратичной функции аппроксимации Rz по модулю pf , т.е. $q(pf)$, коррелирующий с рядом Rz с положительным сдвигом Δt . В качестве такого ряда выступает квадратично преобразованный модуль полярного поля pf . Если горизонт авторегрессионного предсказания Rz равен T , то, когда предиктор $q(pf)$ сильно коррелирован с Rz , горизонт авторегрессионного предсказания $q(pf)$ тоже равен T , а с учетом наличия сдвига между рядами эффективный горизонт предсказания Rz становится равным $T + \Delta t$.

Для прогнозирования вариаций предиктора pf в 24-м цикле солнечной активности использовался сингулярный спектральный анализ.

На рис. 6. ряд данных измерений полярного поля pf приводится с интервалом 10 дней (см. <http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif>).

Для выявления значимых вариаций Rz использовались данные об экваториально поле ef , взятые с тем же интервалом измерений, что и полярное поле pf с того же сайта.

3.2. Результаты анализа

Для того чтобы устранить шум в ряде Rz , была проведена операция усреднения. Интервал усреднения выбирался, исходя из коэффициента корреляции между величинами Rz и ef , поскольку предполагалось, что основные крупномасштабные вариации Rz повторяют вариации ef . На рис. 7 представлена зависимость коэффициента корреляции от интервала усреднения.

Оптимальный интервал выбирался из соображений максимизации коэффициента корреляции между сглаженными рядами Rz и ef при условии, что интервал усреднения не выходит за пределы величин, сравнимых с 11-летним циклом, т.е. когда может быть

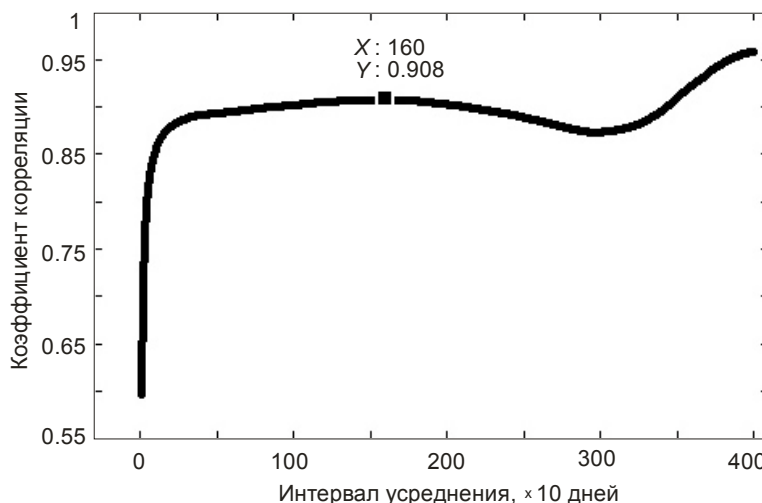


Рис. 7. Выбор интервала усреднения для исходных данных

упущена 11-летняя периодичность. На рис. 7 видно, что оптимальный период усреднения составляет 160 десятидневных интервалов, или $160 \cdot \frac{10}{365} = 4.4$ года.

На рис. 8 показаны результаты усреднения значений Rz , ef и модуля полярного поля pf .

Далее осуществлялся поиск оптимального предвестника – ef и модуля pf со сдвигом, по которому будет прогнозироваться Rz -индекс. Для этого анализировались коэффициенты детерминации (K) зависимости величины Rz от линейной комбинации $q(|pf|)$ и ef при разных сдвигах ef и модуля pf . На рис. 9 (слева) показаны результаты такого исследования.

На рис. 9 (справа) представлены исключительно те линейные зависимости, в которых коэффициенты при $q(|pf|)$ и ef неотрицательны (т.е. полученные с запретом инверсии, поскольку наличие отрицательного коэффициента при $q(|pf|)$ и/или ef , на наш взгляд, нефизично).

На рис. 9 (справа), для варианта без инверсии, видно, что максимальный коэффициент K , равный 0.96, получается для смещения $ef = 0$ лет и для смещения $pf = 5.53$ года.

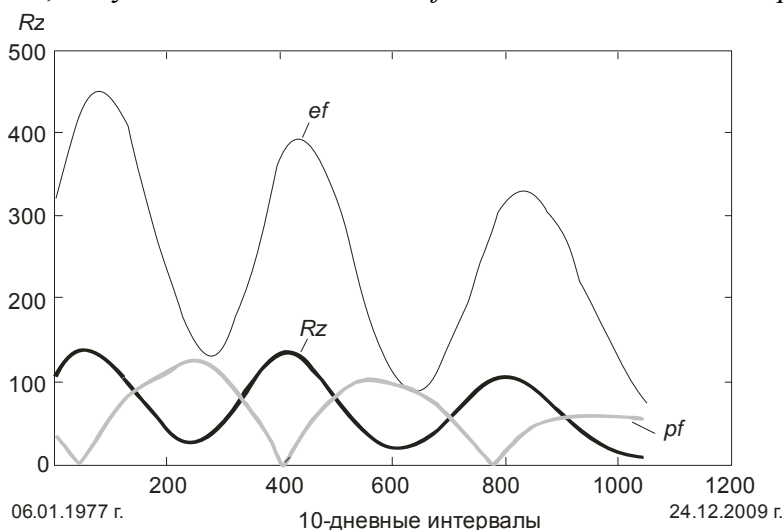


Рис. 8. Данные по Rz , ef , модулю pf , усредненные по 4.4-летним интервалам

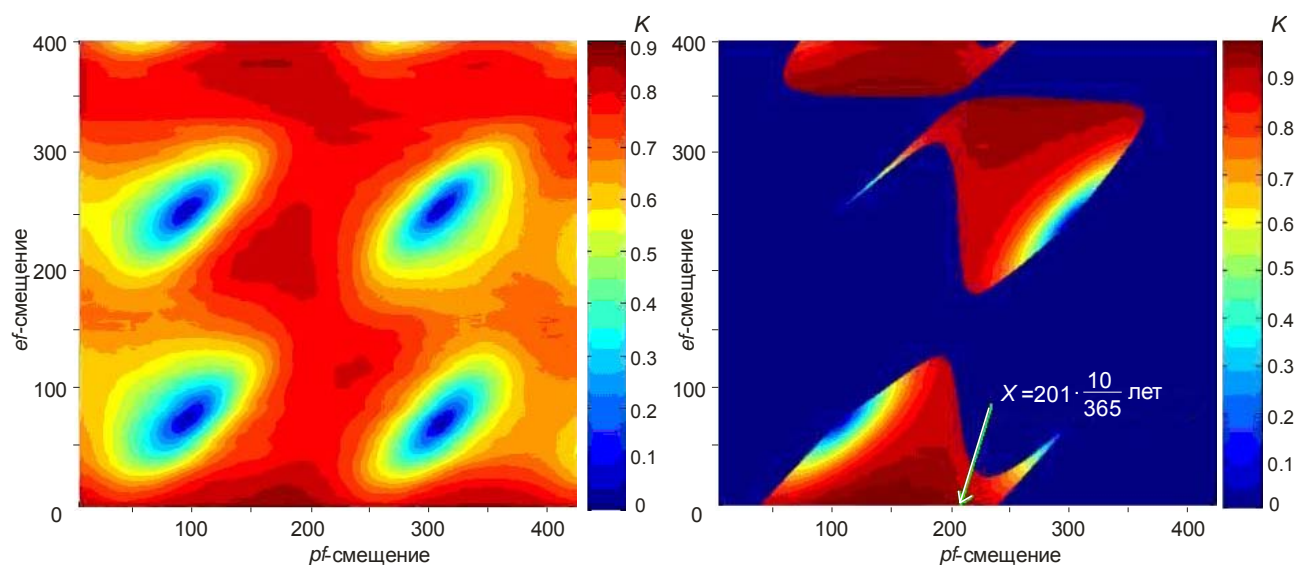


Рис. 9. Коэффициент детерминации (K) между Rz и смещением вперед, необходимым для предсказания, линейной комбинации усредненных значений временного ряда для ef (96 %) и модуля pf (6 %), «мозаичная» картина имеет период 10.3 года (слева). Справа показано то же, но с запретом инверсии модуля pf

Таким образом, для расширения горизонта прогноза Rz -индекса в качестве предиктора, как следует из рис. 9, можно использовать временной ряд модуля pf с положительным сдвигом $\Delta t=5.5$ лет. Временной ряд ef использовать неразумно, так как он не имеет положительного сдвига.

На рис. 10 показаны результаты линейного предсказания вариаций полярного поля pf в следующем 24-м цикле, изображенные в виде модуля. Для того чтобы теперь построить прогноз Rz -индекса по вариациям pf , использовалась диаграмма зависимости $Rz(pf)$ по всем имеющимся данным и производилась аппроксимация этой зависимости параболой (рис. 11).

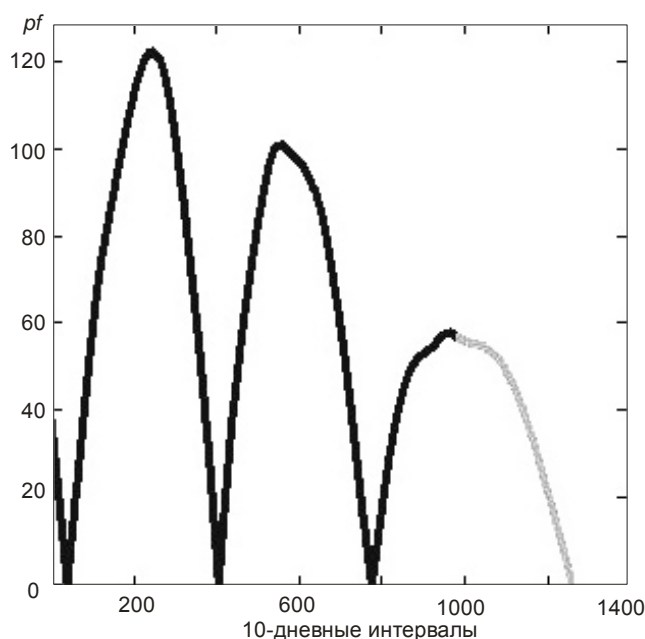


Рис. 10. Вариации модуля pf в анализируемых 22-м и 23-м циклах вместе с предсказанными значениями для 24-го цикла, показанными серой кривой

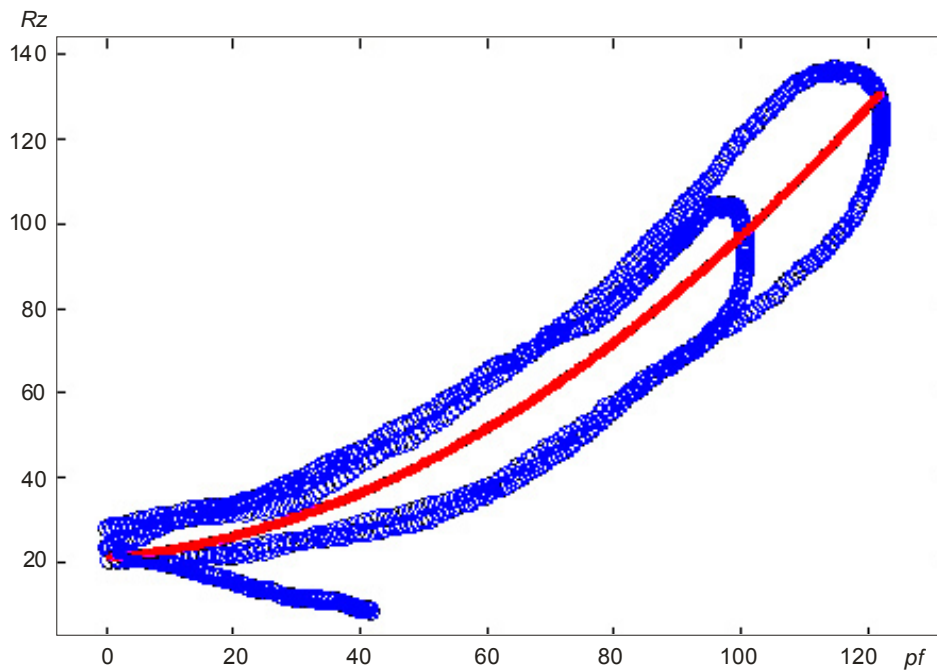


Рис. 11. Диаграмма рассеяния совместного распределения модуля pf (сдвинутого на 5.5. лет) и Rz -индекса. Красной параболой показана нелинейная зависимость между ними

В соответствии с рис. 11 можно получить аналитическое выражение для зависимости Rz ($|pf$):

$$Rz = 0.0063 pf^2 + 0.1359 pf + 20.7236.$$

На рис. 12 даны вариации Rz -индекса в 24-м цикле, предсказанные с помощью предсказанных вариаций модуля pf и зависимости между модулем pf и Rz -индексом, показанной на рис. 11.

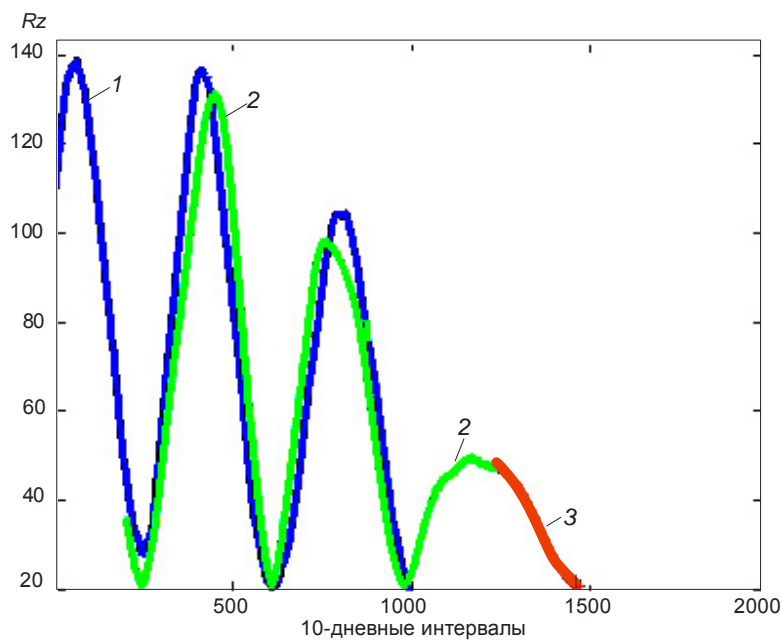


Рис. 12. Предсказание значений Rz по предсказанному полярному полю pf в 24-м цикле с учетом зависимости Rz от модуля pf , показанной на рис. 11

1 – исходный ряд; 2 – аппроксимация; 3 – прогноз солнечной активности

Как можно видеть на рис. 12, описанная выше параболическая аппроксимация зависимости Rz ($|pfl$) вполне удовлетворительно описывает 22-й и 23-й циклы. Ожидаемое значение максимума Rz 24-го цикла в рамках этой модели прогноза равно 50 и время наступления максимума – апрель 2012 г. Однако с учетом того, что исходно используются усредненные по 4.4 года данные, получившееся значение максимума заведомо может оказаться на 20–30 % ниже реального. Поэтому следует оговориться, что прогнозируемая нами величина 50 единиц соответствует среднегодовым сглаженным значениям Rz , равным 60–70. Это, кстати, близко к тому, что получено нами в разделе 2.2 (см. рис. 6) с использованием нейросетевого подхода.

4. Обсуждение и выводы

Наступление минимума 23-го цикла ожидалось в 2006 г., однако падение солнечной активности продолжалось вплоть до начала 2009 г. Затянувшаяся нисходящая ветвь 23-го цикла, приведшая к тому, что минимум цикла имел необычайно большую продолжительность, давно уже вызвал серьезное обсуждение в публикациях, посвященных сравнительному анализу известных исторических циклов солнечной активности, а также современному состоянию характеристик межпланетного пространства (солнечного ветра, межпланетного магнитного поля – ММП) и околоземного пространства. В частности, в работе [Russell et al., 2010] показано, что в конце 2008 г. исчезли наблюдавшиеся ранее периодические осцилляции скорости солнечного ветра, и сама величина скорости в конце 2008 г. и в 2009–1200 гг. не превышала 300–350 км/с. Существенно уменьшилась в это же время интенсивность энергичных электронов в радиационных поясах. На нисходящей ветви 23-го цикла обнаруживается глубокий минимум в значениях ММП и концентрации протонов солнечного ветра с продолжающимся нисходящим трендом, никогда не наблюдавшийся ранее с самого начала измерений этих параметров космическими аппаратами. Подобный тренд наблюдался также и на высоких гелиогеографических широтах на космическом аппарате «Улиссис» [Smith, Balogh, 2008].

Затянувшийся минимум 23-го цикла, обстановка в околоземном космическом пространстве, соответствующая этому циклу, а также аномально низкие значения Rz в максимуме 24-го цикла, предсказанные нами, напоминают сценарий перехода солнечной активности к историческому далтоновскому минимуму в циклах 3, 4, 5 и 6 (рис. 13). Чрезвычайно низкая активность Солнца в далтоновском минимуме привела к некоторому похолоданию климата (например, замерзла р. Темза, на льду которой в 1814 г. в Лондоне устраивались ярмарки).

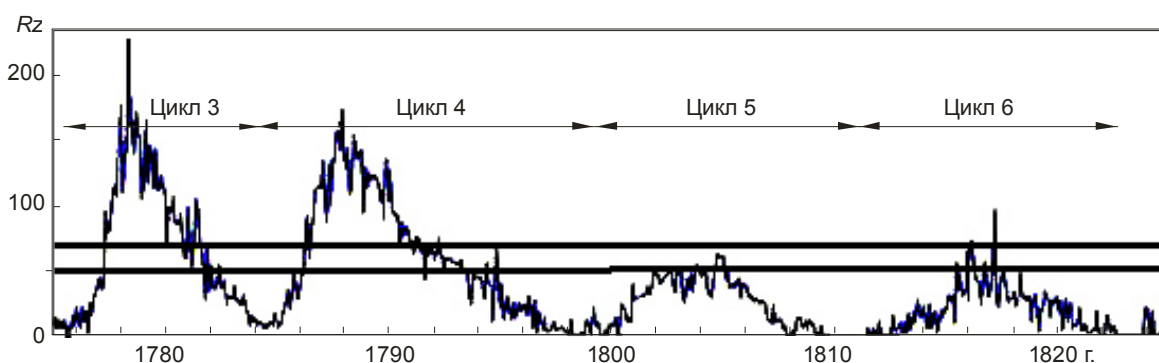


Рис. 13. Числа Вольфа Rz в период циклов 3, 4, 5 и 6, соответствующих вхождению солнечной активности в далтоновский минимум. Черными чертами отмечены величины Rz для предсказанного нами 24-го цикла

Таким образом, проведенный анализ вариаций чисел Вольфа R_z и попытки осуществить предсказание 24-го цикла солнечной активности различными методами в данной работе показали что:

1) предложенные линейные авторегрессионные методы (неитеративные и итеративные) дают большую величину R_z – амплитуды максимума 24-го цикла – 107 и 128 соответственно. Полученные значения находятся внутри диапазона, предсказанного Третьей официальной комиссией по предсказанию циклов солнечной активности, созданной НАСА и НОАА, а также Международной службой охраны окружающей среды (ISES) для некоторых подходов и моделей (120–160);

2) использованный нами итеративный нелинейный метод с применением нейросети, в отличие от других подходов, дал наилучшее соответствие предсказанного и реального значений R_z как для необычно затянувшегося 23-го цикла, так и для начальной фазы 24-го цикла. Для максимальной амплитуды 24-го цикла предсказанное значение равно 70;

3) предложенный метод предвестника позволяет расширить горизонт предсказания R_z на один цикл, базируясь на динамике солнечного полярного магнитного поля. Максимум 24-го цикла в соответствии с этим методом ожидается в апреле 2012 г. и его амплитуда может быть порядка 60–70. Это близко к значению, предсказанному с помощью нейросетевого метода.

Благодарности

Т.К. Бреус и В.А. Ожередовым работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине». Т.К. Бреус благодарит Льва Пустильника и Крисса Рассела (Chris Russell) за плодотворное обсуждение.

Литература

- Макаров В.И., Тлатов А.Г. Крупномасштабные солнечные магнитные поля и 11-летний цикл солнечной активности // АЖ. 2000. Т. 44. С. 759–765.
- Пытьев Ю.П. Методы анализа и интерпретации эксперимента. М., 1990. 286 с.
- Douglas Biesecker. 2008. <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/SC24/>
- Duhau S. An early prediction of Maximum sunspot number in solar cycle 24 // Sol. Phys. 2003. V. 213, N 1. P. 203–213.
- Fessant P., Lantos P. Comparison of neural network and McNish and Lincoln methods for the prediction of the smoothed sunspot index // Sol. Phys. 1996. V. 168, N 2. P. 423–433.
- Feynman I. Geomagnetic and Solar Wind cycles, 1909–1975 // JGR. 1982. V. 87. P. 6153–6162.
- Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichmann E.J. A synthesis of solar cycle prediction techniques // JGR. 1999. V. 104. P. 22 375, doi:10.1029/1999JA900313.
- Kane R.P. Did predictions of the maximum Sunspot number for solar cycle 23 Come True // Sol. Phys. 2001. V. 202, N 2. P. 395–406.
- Kane R.P. Prediction of Solar activity. Role of long-term variations // JGR. 2002. V. 107, N A7. P. SSH3-1–SSH3-3
- Lantos P., Richard O. On the prediction of maximum amplitude for solar cycle using geomagnetic precursors // Sol. Phys. 1998. V. 182. P. 231–246.

- Loskutov A.N., Istomin I.A., Kusanyan K.M., Kotlyarov O.L.* Testing and forecasting the time series of the solar activity by singular spectrum analysis // *Nonlin. Phenomena in Complex Syst.* 2001. V. 4, N 1. P. 47–57.
- Mahalanobis P.C.* On the generalized distance in statistics // *Proceedings of the National Institute of Sciences of India.* 1936. V. 2, N 1. P. 49–55.
- McNish A.G., Lincoln J.V.* Prediction of sunspot numbers // *EOS Transact. AGU.* 1949. V. 30. P. 673–685.
- McPherson K.P., Conway A.J., Brown J.C.* Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural network // *IGR.* 1995. V. 100, N A11. P. 21.735–21.744.
- Meyer F., De A.* Transfer function model for the sunspot number // *Sol. Phys.* 2003. V. 217, N 2. P. 349–366.
- Obridko V.N., Kuklin G.V.* Solar cycle predictions based on solar cycles phases // *Sol.-Terr. Predic. Proc. / Eds. J. Hruska et al.* 1994. V. 2. P. 273–298.
- Obridko V.N.* Some comments on the problem of solar cycle prediction // *Sol. Phys.* 1995. V. 156. P. 179–190.
- Ohl A.I., Ohl G.I.* A new method of very long-term prediction of Solar activity // *Sol.-Terr. Predic. Proc. / Ed. R.F. Donnely.* Boulder, 1979. V. 2. P. 258–263.
- Ozheredov V.A., Breus T.K., Obridko V.N.* Singular spectral analysis in solar-terrestrial physics // *Proceedings of the Russian Bulgarian Conference, Sunny Beach, September Fundamental Space Research.* 2009. P. 1–5.
- Pesnell W.D.* Predictions of solar cycle 24 // *Sol. Phys.* 2008. V. 252. P. 209–220. DOI 10.1007/s11207-008-9252-2.
- Petrovay K.* Solar cycle prediction // *Living Rev. Sol. Phys.* 2010. V. 7. P. 6–59. <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-6>
- Russell C.T., Luhmann J.G., Jian L.K.* How unprecedented a Solar minimum // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. P. RG2004. DOI:10.1029/2009RG000316.
- Schatten K.* Solar activity prediction. Timing predictors and cycle 24 // *JGR.* 2002. V. 107, N A11. P. SSH15–SSH22.
- Schatten K.* Solar activity and the solar cycle // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32, N 4. P. 451–460.
- Smith E.J., Balogh A.* Decrease in heliospheric magnetic flux in this Solar minimum: Recent Ulysses magnetic field observations // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L22103. DOI:10.1029/2008GL035345.
- Svalgard L., Cliver E.W., Kamide Y.* Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L01104. DOI:10.1029/2004GL021664.
- Wang J.L., Gong J.C., Liu S.Q. et al.* The prediction of maximum amplitudes of solar cycles and the maximum amplitude of solar cycle 24 // *Chinese J. of Astron. & Astrophys.* 2002. V. 2. P. 557–562.

Сведения об авторах

ОЖЕРЕДОВ Вадим Андреевич – кандидат физико-математических наук, ведущий математик, Институт космических исследований РАН. 117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: 8-916-551-85-42. E-mail: ojymail@mail.ru

БРЕУС Тамара Константиновна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт космических исследований РАН. 117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: 8-916-821-27-44. E-mail: breus36@mail.ru

ОБРИДКО Владимир Нухимович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН. Московская область, г. Троицк. E-mail: obridko@mail.ru

FORECAST OF THE TOTAL SOLAR ACTIVITY CYCLE 24 BY SEVERAL AUTOREGRESSIVE METHODS AND BY THE PRECURSOR METHOD

V.A. Ozheredov¹, T.K. Breus¹, V.N. Obridko²

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Institute of the Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-wave propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow District, Russia

Abstract. A considerable difference in maximum amplitude of solar cycle 24 predicted by various methods exists according to conclusion of the Third Official Prediction Panel National Aeronautics and Space Administration (NASA) and National Oceanic and Space Administration (NOAA), and International Environment Service (ISSE).

Aim of our study is to update solar cycle 24 forecast by comparative analysis of this problem using linear autoregressive approaches, nonlinear Neural-based method and method of precursor. As a predictor for construction of the solar cycle 24, we used an idea on dynamics of the solar magnetic fields forming solar spots, being basic for estimations of Wolf numbers Rz . For forecasting of variations of predictor – the solar polar field – in solar cycle 24 the singular spectral analysis was used.

Results: Our nonlinear Neural-based prediction gave value 70 for solar cycle 24 amplitude. The proposed forecasting by precursor method based on solar polar field variations allows expanding a horizon of Rz prediction on one cycle. The solar cycle 24 maximum is predicted by this method had to happen in April, 2012, and its amplitude can be about 50. Taking into account that this value had been obtained on the basis of averaged data, we can increase obtained amplitude by 20–30 % and have values about 60–70, i.e. closer to the value obtained by Neural-based method. The prolonged minimum of the solar cycle 23 and abnormal predicted values of Rz for the maximum of solar cycle 24 remind the scenario of transition of solar activity to the historical Dalton minimum.

Keywords: Wolf numbers, cycle 24 predictions, autoregressive methods, Neural-based approach, precursor.